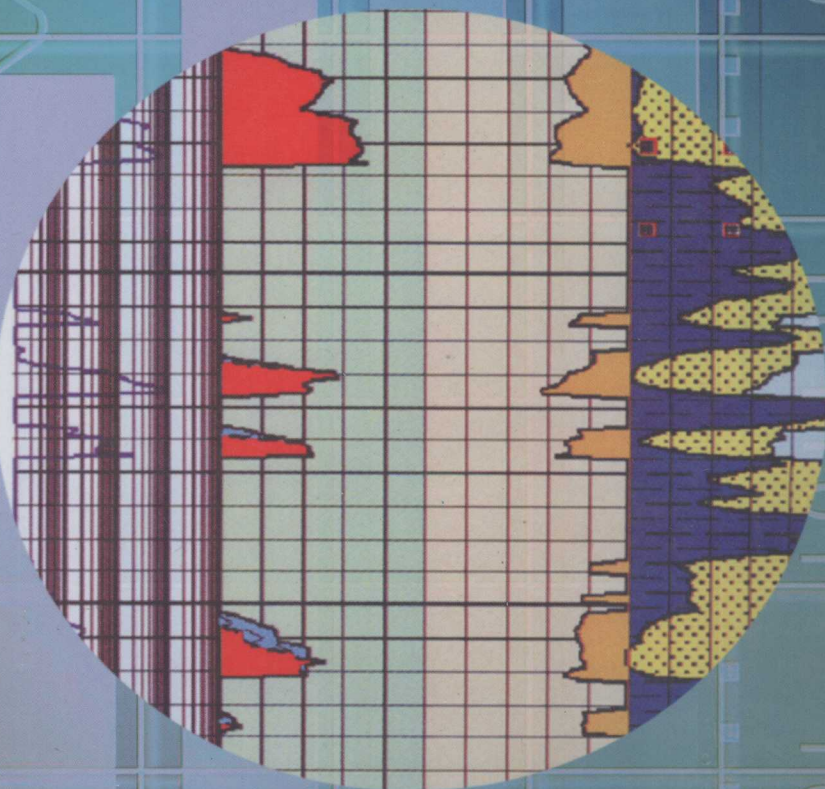




中国石油集团测井有限公司

测井解释技术优秀论文集

中国石油集团测井有限公司 编



石油工业出版社

中国石油集团测井有限公司

测井解释技术优秀论文集

中国石油集团测井有限公司 编

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

中国石油集团测井有限公司测井解释技术优秀论文集/中国石油集团测井有限公司编. —北京: 石油工业出版社, 2005.8

ISBN 7-5021-5203-2

I. 中…

II. 李…

III. 油气测井—地质解释—文集

IV. TE151-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 098164 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 河北天普润印刷厂

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

开本: 889×1194 毫米 1/16 印张: 35.25

字数: 1000 千字 印数: 1—1100 册

定价: 118.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

《中国石油集团测井有限公司
测井解释技术优秀论文集》编辑委员会

主 任：李剑浩

副主任：李储龙 胡启月 王春利

委 员：王国平 姚绪刚 刘士安 施培华

史传法 张家林 王敬农 王成来

主 编：郑庆林

专家组：孙宝佃 杨永发 杨 林 梅基席

刘洪亮 杨洪明 高 敏 赵建武

冯春珍 陈晓明

序

中油测井自 2002 年 12 月成立以来,已经走过近三年的历程。三年来,公司始终坚持“用先进技术为油田勘探开发提供优质服务”的工作方针,在以成套装备为核心,发展测井采集技术的同时,努力发展测井解释技术。在测井解释技术方面,我们针对油田勘探开发的难题积极开展测井解释研究工作,取得了较大进步。具体表现在以下七个方面:第一,在低孔低渗储层评价方面,建立了求取孔、渗、饱储层参数的计算公式,并用储层参数建立了解释标准;第二,基本搞清了低阻油气储层的成因与分布,确立了孔、渗、饱、束缚水含量等储层参数的解释公式,并用储层参数建立了解释标准;第三,在水淹层解释方面取得了突破,主要体现在利用阵列感应识别水淹层取得了显著效果;第四,裂缝储层的识别与评价方面,采用分别计算基块孔隙度和裂缝孔隙度的方法取得很好的应用效果,另外成像测井和倾角测井为裂缝的有效性评价提供了很好的途径。第五,在剩余油饱和度检测方面,华北事业部的 RMT、吐哈事业部的 PNP 和长庆事业部的中子寿命应用效果显著;第六,充分扩展了测井资料的应用范围,如利用测井资料进行产能预测、地应力预测、物源分析、有利储层相带预测等地质预测技术有了很大的进展,另外,在煤层气、储气库等方面测井评价技术也得到了很好的应用;第七,在生产测井方面,产能预测、套损检测、固井质量评价等已经取得了较高的成就。当前我们解释工作的主要技术路线是:求准储层参数,用储层参数建立解释标准,用解释标准和经验相结合进行综合解释。下一步工作的总体目标是建立解释系统,识别与评价油气藏。

本书收集了中油测井公司优秀测井解释技术论文中的一些代表作,这些论文凝聚了公司科技人员辛勤汗水!较为全面地反映了公司测井解释技术的发展水平。希望本书能为公司测井解释技术的进一步发展做出贡献!

用世界眼光和时代眼光审视测井技术的发展,我们感到市场竞争日趋激烈,技术进步日新月异,形势逼人,不进则退。测井技术从基本的电阻率测井、声波测井、放射性测井和核磁共振测井方法出发,充分利用当代最先进的技术成果,已经进入全面满足油田勘探开发需要的新时代。我们必须加快发展,迎头赶上。希望公司广大科技人员共同努力,把我们的事业推向前进。

中国石油集团测井有限公司总经理

李剑浩

2005 年 4 月

前 言

油田勘探开发的需求是测井技术进步的方向和动力。而测井技术成果的好坏直接体现在测井资料分析和解释的过程之中,因此测井资料分析解释是整个测井学的一个重要分支。公司自 2002 年 12 月成立以来,在统一领导和部署下,科技人员在测井解释技术的发展上做了大量的工作,分别就解决各自所在的工区所面临的难题,取得了较好的成绩。在解释标准和解释经验相结合的基础上,精细解释,形成了低孔、低渗透油气藏识别与评价技术、低电阻率油气储层识别与评价技术、水淹层和剩余油测井解释技术、生产测井解释技术、测井资料的扩展应用研究、区块多井综合评价技术、大斜度井及水平井(含随钻测井)解释技术、测井解释基础理论研究等九大板块测井解释技术。使公司的解释水平不断提高,解释符合率达到较高的水平,其中开发井解释符合率达到 85%,探井解释符合率达到 80% 以上。本书精选了公司解释技术交流会上交流的优秀论文,充分展示了我们在测井解释方面取得的成就。这将为公司的解释技术的发展奠定良好的基础。

成绩只能说明过去,摆在我们面前的任务十分艰巨,许多油田勘探、开发中的测井解释难题需要我们去攻克,测井解释基础理论需要进一步发展,国内外广阔的测井市场需要我们去开拓。全球化的技术与市场竞争更加激烈,我们任重而道远。我们必须围绕公司“国内第一、国际一流”的战略目标,众志成城,发展公司的核心解释技术,为我国的测井事业做出应有的贡献,为我国的石油工业持续发展再谱新篇。

目 录

第一篇 测井解释基础理论研究

混合物整体电导率和各成分电导率的关系	(3)
低孔隙度条件下阿尔奇含水饱和度解释模型改进——以 A 气田为例	(17)
用 T_2 截止值方法来确定 BVI 的可靠性分析及改进方法	(22)
岩石粒径与核磁共振特性实验研究	(28)

第二篇 低孔低渗透油气藏识别与评价技术

低孔低渗储层油水定量解释技术应用	(39)
乌里雅斯太低孔低渗储层测井综合评价	(45)
长庆油田低孔低渗砂岩气层测井识别方法概述	(52)
榆林气田上古生界气层测井解释方法研究及应用评价	(60)
鄂尔多斯盆地延长组低渗透油藏中微电极曲线的应用	(79)

第三篇 低电阻率储层识别与评价技术

华北油田低电阻油层识别与测井评价技术	(87)
鄂尔多斯盆地低阻油层成因分析及解释方法	(94)
低阻油层测井资料综合解释	(102)

第四篇 复杂储层测井识别与评价技术

柴达木盆地第四系高泥质含量疏松砂岩气层解释方法	(121)
砾岩储层测井解释评价技术	(135)
泥灰岩储层测井综合评价	(140)
安山岩、火成岩测井解释评价技术	(148)
巴音都兰凹陷含黄铁矿储层测井综合评价	(156)
廊固凹陷低矿化度低饱和度油藏测井解释方法研究	(162)
新方法测井在华北油田碳酸盐岩潜山油气藏综合评价中的应用	(170)

第五篇 水淹层、剩余油测井解释技术

水淹层测井解释技术研究	(185)
砂泥岩水淹层测井资料解释方法研究	(190)
阵列感应测井水淹层识别方法研究	(199)
吐哈油田过套管产层评价测井技术的现状	(206)
注钆中子寿命测井的应用研究	(211)
C/O 测井在油田开发中的应用	(219)
RMT 测井技术在华北油田的初步应用	(229)
中子伽马水淹层测井解释在华北油田的应用	(235)
应用生产测井资料预测油藏剩余油分布	(242)
中子—中子 (PNN) 测井在长庆油田的初步应用	(249)

多种测井信息在水淹层解释中的应用.....	(255)
-----------------------	-------

第六篇 生产测井解释技术

压裂裂缝高度监测方法及应用.....	(263)
复杂注产气剖面资料解释方法研究.....	(272)
氧活化测井技术在华北油田的应用.....	(279)
放射性同位素吸水剖面测井资料的污染校正解释方法及应用.....	(284)
十八臂井径磁测组合测井仪解释方法及在长庆油田的应用研究.....	(290)
生产测井资料解释 LEAD 软件平台开发与应用.....	(299)

第七篇 测井资料的应用研究

砂岩储层产能预测技术研究.....	(309)
复杂孔隙结构砂岩储层产能预测.....	(316)
二连低孔低渗储层产能预测方法.....	(324)
碳酸盐岩储层产能预测方法探索.....	(330)
鄂尔多斯盆地东侧下古生界碳酸盐岩地层裂缝发育特征及应力展布规律研究.....	(336)
天然气测井解释技术.....	(343)
利用偶极横波资料进行疑难气层评价.....	(350)
廊固凹陷异常压力与天然气的分布和产出关系.....	(354)
中子伽马时间推移测井天然气解释在华北油田的应用.....	(360)
煤层气测井评价技术研究.....	(368)
储气库测井解释评价方法.....	(372)
盐岩测井综合评价及蠕变分析.....	(376)
中子测井在检测盐穴地下储气库腔体密封性中的探索与应用.....	(384)
地层倾角测井资料综合应用.....	(388)
地应力、裂缝测试技术在华北油田的应用.....	(401)
地层倾角测井在二连油田勘探开发中的应用.....	(409)
多种测井信息在测井沉积学研究方面的应用.....	(415)
正交偶极子阵列声波测井在西峰油田的应用研究.....	(424)
成像测井地质应用.....	(429)
井下超声电视测井资料的解释与应用.....	(438)
阵列感应电阻率测井在华北油田冀中坳陷的应用.....	(446)
用核磁共振测井资料评价储层的孔隙结构.....	(453)
核磁共振测井的地质应用.....	(460)
俄罗斯感应测井仪在长庆油田测井解释中的初步应用.....	(469)

第八篇 区块多井测井评价技术

利用地震、地质、测井资料进行油藏描述.....	(479)
留西构造带测井综合评价.....	(483)
饶阳凹陷重点开发区块测井综合研究.....	(490)
福山凹陷花场构造带流三段测井综合解释研究.....	(498)
泉 241 断块测井解释综合评价.....	(508)
冀中测井解释符合率分析及解释标准完善.....	(515)

盘古梁地区侏罗系延安组储层划分与油水判识.....	(526)
---------------------------	-------

第九篇 大斜度井、水平井随钻测井解释技术

大斜度井、水平井测井资料处理解释技术.....	(539)
-------------------------	-------

随钻测井解释方法探讨.....	(546)
-----------------	-------

第一篇

测井解释基础理论研究

混合物整体电导率和各成分电导率的关系

李剑浩

中国石油集团测井有限公司

摘要 本文给出了混合物中电场方程的平均形式,在此基础上推导出了混合物整体电导率和各成分电导率的关系,并通过类比给出了混合物整体介电常数和各成分介电常数的关系。作为所得结果的应用,给出了岩石的电导率公式。

关键词: 电场理论 混合物 电导率 介电常数 岩石

揭示混合物整体电导率和各成分电导率的关系,是一项有重要理论意义和实用价值的工作。对于各成分电导率变化量小于各成分电导率平均值的混合物,这种关系已经得出^[1]。为了得出一般情况下的这种关系,就要对混合物的电性进行深入研究。

本文给出了混合物中电场方程的平均形式,在此基础上推导出了混合物整体电导率和各成分电导率的关系,并通过类比给出了混合物整体介电常数和各成分介电常数的关系。作为所得结果的应用,给出了岩石的电导率公式,并用实验资料验证了这个公式的正确性。

1 基本方程的建立

设混合物所在的区域为 V , V 中电场的变化仅由介质的非均匀性引起,在 V 中对欧姆定律 $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ 求平均得

$$\bar{\mathbf{J}} = \sigma_M \bar{\mathbf{E}} \quad (1)$$

式中: σ_M 是根据积分中值定理得出的混合物整体电导率,字母上面的符号“ $\bar{}$ ”表示在 V 中求平均值, $\mathbf{J}$ 为电流密度, $\mathbf{E}$ 为电场强度, $\bar{\mathbf{E}}$ 和 $\mathbf{E}$ 的关系为

$$\mathbf{E} = \bar{\mathbf{E}} + \delta \mathbf{E} \quad (2)$$

式中: $\delta \mathbf{E}$ 为电场强度的变化量。将电导率 σ 也表示为同样的形式

$$\sigma = \bar{\sigma} + \delta \sigma \quad (3)$$

式中: $\delta \sigma$ 为电导率的变化量。 σ 还有另一种表示法

$$\sigma = \sigma_M + \delta_1 \sigma \quad (4)$$

式中: $\delta_1 \sigma$ 为电导率的另一种变化量。

设混合物的一种或几种成分所在的区域为 v , 在 v 中对欧姆定律求平均得

$$\langle \mathbf{J} \rangle = \sigma_m \langle \mathbf{E} \rangle \quad (5)$$

式中: σ_m 是 v 中的等效电导率, σ_m 随着 v 的改变而改变。当 v 中只有一种成分时, σ_m 就是该种成分的电导率。式中字母两边的符号“ $\langle \rangle$ ”表示在 v 中求平均值。

将式 (2) 和 (3) 代入欧姆定律求平均得

$$\bar{\mathbf{J}} = (\bar{\sigma} + \delta \sigma) (\bar{\mathbf{E}} + \delta \mathbf{E}) = \bar{\sigma} \bar{\mathbf{E}} + \delta \sigma \delta \mathbf{E} \quad (6)$$

其中 $\overline{\delta \sigma} = 0$, $\overline{\delta \mathbf{E}} = 0$ 。由式 (1) 和 (6) 得

$$\overline{\delta\sigma\delta\mathbf{E}} = (\sigma_m - \bar{\sigma}) \bar{\mathbf{E}} \quad (7)$$

由此可见, $\overline{\delta\sigma\delta\mathbf{E}}$ 只在 $\bar{\mathbf{E}}$ 的方向上才不为 0。

将式 (2) 和 (4) 代入电流的连续性方程 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$, 其中 ∇ 为哈密顿算子, 则有

$$\nabla \cdot ((\sigma_M + \delta_1\sigma)(\bar{\mathbf{E}} + \delta\mathbf{E})) = \sigma_M \nabla \cdot \delta\mathbf{E} + \nabla \cdot (\delta_1\sigma \bar{\mathbf{E}}) + \nabla \cdot (\delta_1\sigma\delta\mathbf{E}) = 0$$

即

$$\sigma_M \nabla \cdot \delta\mathbf{E} + \nabla \cdot (\delta_1\sigma\delta\mathbf{E}) = -\nabla \cdot (\delta_1\sigma \bar{\mathbf{E}}) \quad (8)$$

上式两端求梯度, 注意到 $\nabla \times \delta\mathbf{E} = 0$, 则有

$$\sigma_M \nabla^2 \delta\mathbf{E} + \nabla (\nabla \cdot (\delta_1\sigma\delta\mathbf{E})) = -\nabla (\nabla \cdot (\delta_1\sigma \bar{\mathbf{E}})) \quad (9)$$

我们要研究式 (9) 在同种成分所在的区域 v 上求平均, 即保持 $\delta_1\sigma$ 不变求平均。设点 Q 只在点 P 所在的那种成分所占的区域 v 上变化, r_p 和 $r_p + r_Q$ 分别是点 P 和点 Q 的位置矢量, 对任一物理量 $W = W(r_p + r_Q)$ 在 v 上求平均

$$\langle W \rangle = \frac{1}{V} \int_v W(r_p + r_Q) dr_Q \quad (10)$$

设 X_i 是 r_p 的某一直角坐标分量, 上式对 X_i 求微分得

$$\begin{aligned} \partial/\partial X_i \langle W \rangle &= \frac{\partial}{\partial X_i} \left(\frac{1}{V} \int_v W(r_p + r_Q) dr_Q \right) \\ &= \frac{1}{V} \int_v \frac{\partial}{\partial X_i} W(r_p + r_Q) dr_Q \\ &= \langle \frac{\partial W}{\partial X_i} \rangle \end{aligned} \quad (11)$$

因此, 利用式 (11) 对式 (9) 在保持 $\delta_1\sigma$ 不变的情况下求平均得

$$\sigma_M \nabla^2 \langle \delta\mathbf{E} \rangle + \nabla (\nabla \cdot (\delta_1\sigma \langle \delta\mathbf{E} \rangle)) = -\nabla (\nabla \cdot (\delta_1\sigma \bar{\mathbf{E}})) \quad (12)$$

不难证明, $\langle \delta\mathbf{E} \rangle$ 只有在 $\bar{\mathbf{E}}$ 方向的分量才不为 0, 而在正交于 $\bar{\mathbf{E}}$ 的另外两方向上的分量都为 0。将混合物中任意一种成分作为第一种成分, 其电导率为 σ_1 , 所在的区域为 v_1 , 而把其它各种成分整体地看成第 2 种成分, 其等效电导率为 σ_m , 所在的区域为 v_m , 设 $\bar{\mathbf{E}}$ 沿 x 方向, 记 $\delta\mathbf{E}$ 的 y 方向的分量 δE_y 在 v_1 中的平均值为 $\langle \delta E_y \rangle_1$, 在 v_m 中的平均值为 $\langle \delta E_y \rangle_m$, 根据 $\overline{\delta\mathbf{E}} = 0$ 和式 (5)、(7) 得

$$v_1 \langle \delta E_y \rangle_1 + v_m \langle \delta E_y \rangle_m = 0 \quad (13)$$

$$v_1 \delta\sigma_1 \langle \delta E_y \rangle_1 + v_m \delta\sigma_m \langle \delta E_y \rangle_m = 0 \quad (14)$$

由此得

$$(\delta\sigma_1 - \delta\sigma_m) v_1 \langle \delta E_y \rangle_1 = 0 \quad (15)$$

一般来说 $\delta\sigma_1 \neq \delta\sigma_m$, 所以

$$\langle \delta E_y \rangle_1 = 0 \quad (16)$$

同理可证, $\delta\mathbf{E}$ 的 z 方向的分量 δE_z 在 v_1 中的平均值 $\langle \delta E_z \rangle_1$ 满足

$$\langle \delta E_z \rangle_1 = 0 \quad (17)$$

结论得证。

现在设 $\bar{\mathbf{E}}$ 沿 n 方向, 并在式 (12) 中取 n 方向的分量, 则有

$$\sigma_M \nabla^2 \langle \delta E_n \rangle + \frac{\partial^2}{\partial n^2} (\delta_1 \sigma \langle \delta E_n \rangle) = - |\bar{E}| \frac{\partial^2 \delta_1 \sigma}{\partial n^2} \quad (18)$$

这就是我们要建立的电场方程的平均形式，它是以下推导所依据的基本方程

2 混合物电导率公式的推导

2.1 沿一个方向变化的混合物

这种混合物是由一系列薄片组成的，同一薄片上各点的电导率相同，不同薄片的电导率可不同。令混合物变化的方向为 x 方向，并使 $\bar{E}$ 沿 x 方向，记 δE 的 x 方向的分量为 δE_{xx} ，根据式 (18)，并注意到此时 $\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \nabla^2$ ，则

$$\nabla^2 (\sigma \langle \delta E_{xx} \rangle + \delta_1 \sigma |\bar{E}|) = 0 \quad (19)$$

由此可得

$$\langle \delta E_{xx} \rangle = - \frac{\delta_1 \sigma}{\sigma} |\bar{E}| \quad (20)$$

对上式在 V 上求平均，因 $\overline{\delta E_{xx}} = 0$ ，则

$$\sigma_M = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sigma}\right)} \quad (21)$$

这就是沿一个方向变化的混合物整体电导率和各成分电导率的关系式，这个结果可以由电阻串联的算法直接得出。

2.2 沿两个方向变化的混合物

这种混合物是由一系列细柱组成的，同一细柱上各点的电导率相同，不同细柱的电导率可不同。令混合物在 xy 平面内变化，当 $\bar{E}$ 沿 x 方向时，记 δE 在 x 方向的分量为 δE_{xx} ；当 $\bar{E}$ 沿 y 方向时，记 δE 在 y 方向的分量为 δE_{yy} ，根据式 (18) 得

$$\sigma_M \nabla^2 \langle \delta E_{xx} \rangle + \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\delta_1 \sigma \langle \delta E_{xx} \rangle) = - \frac{\partial^2 \delta_1 \sigma}{\partial x^2} |\bar{E}| \quad (22)$$

$$\sigma_M \nabla^2 \langle \delta E_{yy} \rangle + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\delta_1 \sigma \langle \delta E_{yy} \rangle) = - \frac{\partial^2 \delta_1 \sigma}{\partial y^2} |\bar{E}| \quad (23)$$

混合物整体来看在 xy 平面内是各向同性的，改变 $\bar{E}$ 的方向， $\langle \delta E \rangle$ 的大小应当不变，即 $\langle \delta E_{xx} \rangle = \langle \delta E_{yy} \rangle$ 。将式 (22)、(23) 相加，注意到此时 $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} = \nabla^2$ ，则有

$$\nabla^2 ((\sigma_M + \sigma) \langle \delta E_{xx} \rangle + \delta_1 \sigma |\bar{E}|) = 0 \quad (24)$$

由此可得

$$\langle \delta E_{xx} \rangle = - \frac{\delta_1 \sigma}{\sigma_M + \sigma} |\bar{E}| \quad (25)$$

对上式在 V 上求平均，因 $\overline{\delta E_{xx}} = 0$ ，则

$$\sigma_M = \frac{1}{2} \frac{1}{\left(\frac{1}{\sigma_M + \sigma}\right)} \quad (26)$$

这就是沿两个方向变化的混合物整体电导率和各成分电导率的关系式。

2.3 沿三个方向变化的混合物

这种混合物是由电导率不同的几种物质颗粒掺杂而成的, 它沿 x 、 y 和 z 三个方向都变化, 当 $\bar{E}$ 分别沿 x 、 y 和 z 方向时, 根据式 (18) 得

$$\sigma_M \nabla^2 \langle \delta E_{xx} \rangle + \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\delta_1 \sigma \langle \delta E_{xx} \rangle) = -\frac{\partial^2 \delta_1 \sigma}{\partial x^2} |\bar{E}| \quad (27)$$

$$\sigma_M \nabla^2 \langle \delta E_{yy} \rangle + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\delta_1 \sigma \langle \delta E_{yy} \rangle) = -\frac{\partial^2 \delta_1 \sigma}{\partial y^2} |\bar{E}| \quad (28)$$

$$\sigma_M \nabla^2 \langle \delta E_{zz} \rangle + \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\delta_1 \sigma \langle \delta E_{zz} \rangle) = -\frac{\partial^2 \delta_1 \sigma}{\partial z^2} |\bar{E}| \quad (29)$$

δE_{zz} 是当 $\bar{E}$ 沿 z 方向时 δE 在 z 方向的分量。混合物整体来看是各向同性的, 改变 $\bar{E}$ 的方向, $\langle \delta E \rangle$ 的大小应当不变, 即 $\langle \delta E_{xx} \rangle = \langle \delta E_{yy} \rangle = \langle \delta E_{zz} \rangle$, 将式 (27)、(28) 和 (29) 相加得

$$\nabla^2 ((2\sigma_M + \sigma) \langle \delta E_{xx} \rangle + \delta_1 \sigma |\bar{E}|) = 0 \quad (30)$$

由此可得

$$\langle \delta E_{xx} \rangle = -\frac{\delta_1 \sigma}{2\sigma_M + \sigma} |\bar{E}| \quad (31)$$

对上式在 V 上求平均, 因 $\overline{\delta E_{xx}} = 0$, 则

$$\sigma_M = \frac{1}{3} \frac{1}{\left(\frac{1}{2\sigma_M + \sigma} \right)} \quad (32)$$

这就是沿三个方向变化的混合物整体电导率和各成分电导率的关系式。

综上所述, 混合物整体电导率和各成分电导率的关系式是

$$\sigma_{M_j} = \frac{1}{j} \frac{1}{\left(\frac{1}{(j-1)\sigma_{M_j} + \sigma} \right)} \quad (j=1, 2, 3) \quad (33)$$

其中: j 表示混合物变化的方向数, σ_{M_j} 表示沿 j 个方向变化的混合物整体电导率。式 (33) 简称为混合物电导率公式。

3 所得结果的应用

3.1 混合物介电常数公式

通过静电场和直流电场的类比, 可得混合物整体介电常数和各成分介电常数的关系式为

$$\epsilon_{M_j} = \frac{1}{j} \frac{1}{\left(\frac{1}{(j-1)\epsilon_{M_j} + \epsilon} \right)} \quad (j=1, 2, 3) \quad (34)$$

其中: ϵ_{M_j} 表示沿 j 个方向变化的混合物的整体介电常数, ϵ 是各点的介电常数。式 (34) 简称为混合物介电常数公式。

3.2 岩石的电导率公式

关于岩石的电导率, 人们进行了大量的研究, 应用式 (33) 可得出新的结果。

表 1 泥质砂岩电导率计算结果与实验结果的对比 ($S_w = 1$)

岩 芯	ϕ	F	σ_t (mS/m)											
			$\sigma_w = 5250, \sigma_{cv} = 6833$		$\sigma_w = 2820, \sigma_{cv} = 5663$		$\sigma_w = 1490, \sigma_{cv} = 4012$		$\sigma_w = 780, \sigma_{cv} = 2828$		$\sigma_w = 405, \sigma_{cv} = 1985$		$\sigma_w = 208, \sigma_{cv} = 1385$	
			ϕ_{cv}	A	ϕ_{cv}	A	ϕ_{cv}	A	ϕ_{cv}	A	ϕ_{cv}	A	ϕ_{cv}	A
1	0.239	11.95	0.0079	443	0.0095	244	0.0134	128	0.0191	68	0.0272	36.3	0.0389	19.3
2	0.212	13.71	0.0079	387	0.0095	214	0.0134	111	0.0191	64.4	0.0272	36.1	0.0389	20.5
3	0.231	10.91	0.0087	486	0.0105	268	0.0148	145	0.0209	78.8	0.0298	43.5	0.0427	24.1
4	0.08	46.36	0.0032	114	0.0039	64.3	0.0055	36.7	0.0078	20.6	0.0111	12	0.0159	7
5	0.254	14.05	0.0145	380	0.0175	216	0.0247	122	0.035	71.1	0.0499	43	0.0714	26.8
6	0.215	17.64	0.0123	303	0.0149	171	0.021	97.1	0.0298	56.8	0.0424	33	0.0608	20.7
7	0.171	25.05	0.0135	214	0.0163	121	0.0231	70.1	0.0327	41.4	0.0466	25.2	0.0668	16
8	0.171	24.05	0.0134	223	0.0162	126	0.0229	71.5	0.0325	41.4	0.0463	24.7	0.0663	16.2
9	0.199	17.05	0.0121	314	0.0146	179	0.0205	103	0.0291	60.2	0.0415	37	0.0595	23.4
10	0.125	140.16	0.021	40.2	0.0253	23.9	0.0357	14.6	0.0507	9.2	0.0722	6	0.1034	3.9
11	0.125	155.2	0.014	35	0.0168	21.1	0.0238	12.7	0.0337	8	0.048	4.9	0.0688	3.2
12	0.11	37.65	0.0169	146	0.0204	89.5	0.0288	57.4	0.0409	36.2	0.0583	24.6	0.0835	19.9
13	0.11	37.6	0.0211	148	0.0254	92.6	0.0359	60.2	0.0509	41.6	0.0725	28.9	0.1039	22.5
14	0.11	27.53	0.0185	200	0.0223	123	0.0315	79.7	0.0447	54.6	0.0637	38	0.0913	29.4
15	0.092	118	0.0242	47.9	0.0291	31.1	0.0411	20.5	0.0584	14.2	0.0832	9.5	0.151	
16	0.103	43.52	0.0307	130	0.037	89.5	0.0523	65.8	0.0742	50.5	0.1032	38		
17	0.14	31.15	0.042	182	0.0507	125	0.0715	92.3	0.1015	68.2				
18	0.259	13.76	0.0664	411	0.0801	273	0.113	192	0.1604	135	0.2285	107	0.2285	107
19	0.259	13.53	0.0552	413	0.0667	263	0.0941	175	0.1335	124	0.1902	89.5	0.1902	89.5
20	0.259	10.87	0.0457	509	0.0551	317	0.0778	206	0.1104	141	0.1573	102	0.1573	102
21	0.238	13.04	0.0269	417	0.0325	255	0.0458	157	0.0651	95.7	0.0927	70.4	0.0927	70.4
22	0.225	23.06	0.0797	252	0.0961	179	0.1357	135	0.1925	109				
23	0.242	16.23	0.0966	363	0.1165	261	0.1645	196	0.2333	158				
24	0.216	25.43	0.094	234	0.1134	177	0.1632	138						
25	0.187	27.17	0.0959	224	0.1158	177	0.1634	148						
26	0.229	19.18	0.1216	314	0.1467	248	0.2071	205						
27	0.209	20.46	0.1116	294	0.1347	241	0.1901	204						

注: A 为实验结果, B 为本文方程计算结果。

岩石是一种混合物,但岩石骨架和岩石所含油气的电导率为 0,为了能在这种情况下应用式 (33),需要用局部求电导率平均值的方法。先求岩石中导体部分的等效电导率 σ_k , 设导体部分的第 k 种成分的电导率为 σ_k , 相对体积为 ϕ_k , 根据式 (33), 令 $j=3$, 则

$$\sigma_e = \frac{1}{3} \frac{\sum_k \phi_k}{\sum_k \frac{\phi_k}{2\sigma_e + \sigma_k}} \quad (35)$$

再将岩石看作由一系列薄片组成的,第一薄片上导体部分所占的相对体积为 ϕ_c , 根据并联电阻的算法,可以以体积平均的方法给出每一薄片上的电导率 σ_m 的表达式

$$\sigma_m = \phi_c \sigma_e \quad (36)$$

根据式 (33), 令 $j=1$, 则可写出岩石电导率 σ_t 的表达式

$$\sigma_t = \frac{\sigma_e}{\left(\frac{1}{\phi_c}\right)} \quad (37)$$

用关于泥质砂岩的实验结果验证式 (35)、(37)。按照双水模型^[2], 泥质砂岩孔隙中含有粘土附近的粘土水和距粘土表面较远的自由水两种导电成分, 粘土水的电导率和相对体积分别用 σ_{cw} 和 ϕ_{cw} 表示, 自由水的电导率和相对体积分别用 σ_w 和 ϕ_w 表示, ϕ_{cw} 和 ϕ_w 满足 $\phi_w = \phi S_w - \phi_{cw}$, 其中 ϕ 和 S_w 分别为总孔隙度和含水饱和度。有了这些量的值, 就可以求 $\sigma_e \cdot \left(\frac{1}{\phi_c}\right)$ 就是地层因素 F 。用式 (35)、(37) 对文献 [2] 附录 B 的实验资料进行了计算, 结果见表 1。 σ_t 计算值的平均相对误差为 7.6%, 与实验值符合很好。

4 结 论

4.1 在混合物整体上的平均值 $\bar{J}$ 和 $\bar{E}$ 满足

$$\bar{J} = \sigma_{M_j} \bar{E}$$

其中

$$\sigma_{M_j} = \frac{1}{j} \frac{1}{\left(\frac{1}{(j-1)\sigma_{M_j} + \sigma}\right)}, \quad (j=1, 2, 3)$$

4.2 在混合物某种成分上的平均值 $\langle \delta E_n \rangle$ 满足

$$\sigma_M \nabla^2 \langle \delta E_n \rangle + \frac{\partial^2}{\partial n^2} (\delta_1 \sigma \langle \delta E_n \rangle) = - \frac{\partial^2 \delta_1 \sigma}{\partial n^2} |\bar{E}|$$

在混合物变化的各方向整体同性的条件下

$$\langle \delta E_n \rangle = - \frac{\delta_1 \sigma}{(j-1)\sigma_{M_j} + \sigma} |\bar{E}|, \quad (j=1, 2, 3)$$

上述结论可类比到静电场和介电常数。